引用格式：张楚汉, 王光谦, 李铁键. 变化环境下城市暴雨致灾防御对策与建议. 中国科学院院刊, 2022, 37(8): 1126-1131.
Zhang C H, Wang G Q, Li T J. Prevention countermeasures and suggestions for urban rainstorm disasters under changing environment. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(8): 1126-1131. (in Chinese)

变化环境下城市暴雨致灾防御对策与建议

张楚汉* 王光谦* 李铁键

1 清华大学 水利水电工程系 北京 100084
2 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室 北京 100084

摘要 2021年7月20日，河南郑州发生特大暴雨，强度和范围突破历史记录，远超城乡防洪排涝能力，导致城市内涝、河流洪水、山洪滑坡等多灾并发，是一次造成重大人员伤亡和财产损失的特别重大自然灾害。放眼全国，谋划未来，建议：深刻认识气候变化和快速城市化对城市洪涝灾害防治的显著影响，提高变化环境下城市洪涝灾害风险意识；将防御洪涝作为确定城市建设空间规划的刚性约束，动态修订相关规划，加快构建城市防御洪涝灾害的工程体系；多措并举，科学提升城市防灾减灾与应急管理水平。

关键词 暴雨，城市，洪涝灾害，工程体系，应急管理

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20220625002

2021年7月17—23日，河南省遭遇历史罕见特大暴雨。7月17—18日，降雨主要发生在豫北；19—20日，暴雨中心南移至郑州，发生长历时特大暴雨；21—22日，暴雨中心再次北移，并于23日逐渐减弱结束。回顾整个降雨过程，鹤壁市累计面雨量最大，为589毫米；郑州市次之，为534毫米，郑州市总降雨量约40亿立方米，相当于蓄满的北京密云水库水量。2021年7月20日郑州国家基本气象站录得最大日降雨量624.1毫米，采用P-III分布拟合郑州站年最大日降雨量序列（不含2021年）可知，7月20日降雨量

*通信作者

资助项目：中国科学院学部咨询评议项目(2021-ZW18-A-031)
修改稿收到日期：2022年7月18日

2021年郑州“7·20”特大暴雨灾害发生后，中国科学院学部咨询评议工作委员会紧急召开主任会议，研究应对河南等地洪涝灾害的应急咨询工作。会议决定委托张楚汉、王光谦两位院士牵头，组织气候气象、水文水利、城市规划及管理等方面的院士专家专题研判，于7月31日完成《城市特大暴雨致灾防御的关键问题与对策》咨询报告，为相关决策提供了重要参考。值郑州“7·20”特大暴雨灾害发生一周年之际，团队认真学习了国务院灾害调查组《河南郑州“7·20”特大暴雨灾害调查报告》，对咨询报告作了进一步补充完善，形成了本篇智库观点文章，供城市防御暴雨洪涝灾害的相关工作参考。参与本文撰写工作的还有：魏加华、方红卫、倪广恒、钟德钰、陈敏、邱奕翔。

超“千年一遇”标准。7月20日16—17时，郑州国家基本气象站录得小时最强雨量201.9毫米，突破我国大陆气象观测记录历史极值，此前1975年8月5日河南林庄录得最大小时雨强为198.5毫米。

河南郑州“7·20”特大暴雨引发特别重大灾害：郑州城区发生严重洪涝和次生灾害，洪水倒灌进入地铁、隧道、医院等处；西部山丘区山洪沟、中小河流发生特大洪水，涨势极为迅猛。郑州市遭受重大人员伤亡和财产损失，并导致大面积停水停电停网，严重影响城市正常运转。此次灾害过程中，郑州市因灾死亡失踪380人，占全省的95.5%。

河南郑州“7·20”特大暴雨是在西太平洋副热带高压异常偏北、夏季风偏强等气候背景下，2个台风汇聚输送海上水汽，与河南上空对流系统叠加，遇伏牛山、太行山地形抬升形成的一次极为罕见特大暴雨过程。国务院调查组调查认定，河南郑州“7·20”特大暴雨灾害是一场因极端暴雨导致严重城市内涝、河流洪水、山洪滑坡等多灾并发，造成重大人员伤亡和财产损失的特别重大自然灾害。总体是“天灾”，具体有“人祸”①。

河南郑州“7·20”特大暴雨强度和范围突破当地历史记录，远超出城乡防洪排涝能力，是形成特别重大自然灾害的主要原因。此次特大暴雨距河南“75· 8”特大洪水灾害不足50年，二者发生的天气形势、暴雨强度基本相似。北京市于2012年发生“7·21”500年一遇特大暴雨造成79人遇难；仅隔4年发生2016年“7·20”特大暴雨，虽然日降雨量为20年一遇水平，但全市降水总量超过2012年“7·21”特大暴雨。

在全球气候变化导致极端天气频发的背景下，城市暴雨洪涝日益多发，我们必须放眼全国，谋划未来，建议：深刻认识气候变化和快速城市化对城市洪涝灾害防治的显著影响，揭示特大暴雨形成和致灾链发展的机理；合理制定、实施城市建设与洪涝防治规划，确保城市防御暴雨洪涝的工程能力达标；科学开展防灾减灾管理与应对，全面提高城市面对超设防暴雨洪涝灾害的减灾应急能力。最终竭力做到遭遇超设防暴雨时人民生命有保护、城市运行不瘫痪、国民经济少损失。

1 提高对变化环境下城市洪涝灾害风险的科学认识

气候变化和城市化共同作用，使城市暴雨频率和强度提高，而城市暴雨产生洪涝灾害的形式复杂多样，随着我国城市数量和规模不断增加，城市暴雨洪涝致灾频繁、损失严重，有必要引起城市管理部门和人民群众的充分重视，提高对城市洪涝灾害风险的科学认识。

（1）气候变化影响显著。研究表明，未来气候变化条件下，我国大部地区暴雨日数和降水强度都将有所增加。即便在《巴黎协定》温升1.5℃理想目标实现的前提下，东亚季风仍有增强趋势，西太平洋热带气旋多发、西太平洋副热带高压偏北等天气条件将有所增加[1,2]，京津冀豫遭遇特大暴雨的概率仍将增大。

（2）城市雨岛效应不容忽视。我国城市化成就显著，大城市城区规模不断扩大，建成区面积超过1 000平方千米的城市已达6个。城市热岛效应影响大气边界层结构，城区高层建筑群增加地表阻力，城市颗粒物排放为降雨提供凝结核。三方面因素均对城区气候和降雨条件产生明显影响，共同作用下使城市降雨更为集中，“雨岛”效应显著[3-5]。在气候变化、城市“雨岛”效应的共同作用下，气候变化和城市化

① 国务院灾害调查组. 河南郑州“7·20”特大暴雨灾害调查报告. (2021-01-21). http://www.gov.cn/xinwen/2022-01/21/content_5669723.htm.

前后的气象水文序列的一致性遭到破坏，城市特大暴雨更易刷新历史纪录，并使重现期较长的暴雨频繁出现。根据历史数据设计建设的防洪排涝工程的绝对能力不变，但失效概率相对设计目标升高。

（3）城市洪涝致灾形式复杂多样。城市因当地及更大区域内的强降雨而遭遇的洪涝灾害主要分为三类：城市毗邻江河洪水、城区内涝、城郊山洪及地质灾害，可能产生的次生灾害则更为复杂。① 城市毗邻江河洪水。江河洪水的规模和影响范围巨大，仍然是洪水灾害的首要形式。我国各级别城市多沿江河分布、依堤防洪，中等以上城市的堤防标准普遍在 100 年一遇以上，重点防洪城市为 200 年一遇。在气候变化和部分河流因河道萎缩、挤占而行洪能力下降的条件下，必须未雨绸缪，认清短板，高度警惕城市遭遇江河洪水灾害的“黑天鹅”事件。② 城区内涝。因城市当地暴雨超过其滞、渗、蓄、排能力引起，是发生在城市内部的水灾害。城市地面硬化使径流系数增大、汇流速度加快，人水争地影响低地蓄水和河道排水空间，骨干排涝管网能力不足，外围江河水位、潮位顶托，均可能成为引起或加重城市内涝的主要原因。③ 城郊山洪及地质灾害。城市郊区多有山地，部分城市依山而建，山区发生特大暴雨易引起山洪和滑坡、泥石流等地质灾害，这类灾害局域性强、过程猛烈，工程防范和预报预警均较为困难，易引起人员伤亡。城郊仍在城市行政管理范围内，应在城市暴雨灾害防御中一并考虑。

（4）城市化进程快速发展，暴雨致灾频繁、损失严重。根据住房与建设部公布的《2020 年城市建设统计年鉴》，我国拥有城区人口百万以上大城市 86 个；根据第七次全国人口普查的最新数据，我国城区人口 500 万以上的特大、超大城市已达 21 个。城市基数与规模快速增长，是我国城市超设防暴雨洪涝灾害频繁发生、损失重大的主要原因。《城镇内涝防治技术规范》（GB51222-2017）为城市内涝防治规定了设计重现期：大城市 30—50 年一遇、特大城市 50—100 年一遇、超大城市 100 年一遇，计算时一般采用年最大值法和日雨量。虽然我国各地气候条件不同，但由于各城市均根据各自气象数据确定不同重现期的暴雨量值，因此可统一估计我国城市总体遭遇超设防暴雨的频次。以城市内涝防治的设计重现期代表城市防御不同形式暴雨洪涝灾害能力的总水平，假设大城市均按 50 年一遇标准设防，则我国平均每年有近 2 个大城市遭遇超设防暴雨；假设特大超大城市均按 100 年一遇标准设防，则我国平均每 5 年将出现一次超设防暴雨事件。因此，仅从概率即可发现，城市暴雨洪涝灾害是我国城市治理和应急管理必须面对的重大问题，必须提高对城市洪涝灾害的风险意识。

2 动态修订规划并加快构建城市防御洪涝灾害的工程体系

城市洪涝灾害防御是一项系统工程，要在城市发展的空间布局中将防御洪涝作为刚性约束，在其基础上完善标准、规范，协调规划，尤其要重视低洼地带的行洪排涝能力、城市周边的水利工程安全，并加强城市各类生命线工程隐患排查，全面建成城市防御洪涝灾害的工程体系。

（1）完善“以水定城”的内涵，以刚性约束统领空间布局。完善“以水定城”的内涵，既将水资源作为确定城市发展规模的刚性约束，又将防御洪涝作为确定城市建设空间布局的刚性约束。在城市规划中通盘考虑城市降雨需要的渗、蓄、排空间，以防御灾害的刚性约束统领空间布局，保留、腾让天然雨洪通道、蓄滞洪空间，避免人水争地。

（2）完善标准、多规协调，补齐规划短板。充分重视城市发展侵占蓄洪行洪空间、城市生命线遇水脆弱等问题，完善不同领域的标准、规范，协调国土空间、洪涝防御、市政交通、海绵城市、河道景观等规划目标，统筹不同等级降雨的生态价值、资源利用、

洪涝蓄泄等综合目标。全面考虑江河洪水防御、城市防涝排涝和城郊山洪防治，针对超设防暴雨，研究制定不同类型不同频率的洪涝灾害风险区划图。具体规划中要考虑气候变化和城市化的影响，补充新数据重新核算城市暴雨频率曲线，复核城市防洪排涝标准，补足欠账，增强城市韧性。

（3）提升标准、蓄排结合，确保行洪排涝能力。城内或跨城交通主干线与城区河流交汇地带、城市大型低洼地带等是城市面对超设防暴雨的主要风险区，内涝外排需求大。城市建设应优化蓄洪空间和排洪通道，加强主要风险区的蓄滞与排涝能力建设，提升标准开展改造，如建设地表或地下蓄滞洪空间、建设排水深隧等。对于自排不畅、外水顶托等薄弱环节，确保抽排水能力达到设防标准，并在遭遇超设防暴雨时正常工作。对于遇城区边界、城市边界的情况，确保洪涝外排通道按设计标准“一路通畅”，不受行政管理边界的影响。

（4）重视城市周边水利工程安全。城市上游供水水库、下游调节水库等水利工程是城市防洪、水资源利用、生态景观所需的重要基础设施，但汛期便是下游老百姓“头上的一盆水”，一旦出现险情将带来重大灾害。要高度重视城市周边水利工程安全，开展安全评估；加强调度管理，严格执行调度规则，减轻大坝压力；加强安全监测和险情巡查，发现问题及时处置；加强水情监测预报，在保障安全的前提下加强雨洪资源利用，防止集中弃水与暴雨叠加；严防极端情况下溃坝，加剧下游灾害。

（5）加强城市各类生命线工程涉水隐患排查。开展市政、水利、交通、电力、燃气、物流、教育、医疗、文体等城市基础设施和生命线工程的涉水安全隐患排查。洪涝易在人口密集、设备集中的地下空间及低洼地段致灾，为此应设置人员应急避险、逃生的专门设施和应急预案，应通过工程措施确保重要地下空间和地下生命线安全。

3 科学提升城市防灾减灾与应急管理水平

以精确天气预报、精准灾害预警为前提，强化领导责任、明确部门职责、联动响应灾情，并在预报预警中充分利用信息化、智能化技术实现以人为本目标，在避险减灾中强化社区组织能力，从而科学提升城市防灾减灾与应急管理水平。

（1）精确预报，精准预警。① 精确的天气预报是发布精准防灾预警的前提。目前气象监测预报能力还不完全满足城市防御特大暴雨灾害的需要，预报的降雨区域、时间、雨强不够精准，未达到空间到街区、时间到小时的程度。应持续加强基础研究和技术开发，提高灾害性天气预报精度。② 明确区分灾害性天气预报和洪涝灾害预警的性质和作用，确保发布灾害预警的精准性、及时性。研究完善城市暴雨内涝预警关键指标和监测系统，南北方不同城市设立包括实测雨量、河流水位、城区积水、预报雨水情等可操作的洪涝灾害预警阈值指标，纳入防灾减灾应急指挥系统。

（2）明确职责，联动响应。加强领导干部责任意识和底线思维，落实各级政府防汛救灾的主体责任和各职能部门的具体职责，严格执行防灾指挥制度和决策流程，理清城市洪涝防御的应急管理职责与联动机制，加强信息发布和组织动员能力。切实落实“大应急”理念，研究气象预报到灾害风险预警的传递机制，制定从政府组织发动、职能部门专业行动，到企业运营单位应急联动、社会公众积极响应的高效快速应急响应联动机制，建立暴雨洪涝灾害紧急情况下的高效协调决策和执行机制，提升城市洪涝防御和应急抢险能力。

（3）以人为本，智慧防灾。针对公众在暴雨洪涝灾害发展过程中信息不全面、不精准、不及时，及引起的风险意识薄弱问题，坚持以人为本，提高城市洪涝灾害监测预警的信息化和智慧化水平，充分考虑人

在灾害环境中的暴露情况，利用室内外精确定位、应急通讯和大数据技术，提高公众信息接收和情势感知能力，对暴露于特定时空受灾风险的人群，通过手机应急预警通知等方式有针对性地发布包含灾害后果的定制化预警信息，并提供迅速有效的行动指引。

（4）强化社区，救助生命。通过开展城市洪涝灾害风险评价，编制发布高精度洪涝风险图并动态更新，提高城市各类单位和居民社区、村对洪涝灾害的风险意识。加强社区、村的宣传教育、组织动员、应急处置能力，落实社区、村的逃生通道、应急通讯、储备物资，在洪涝灾害风险教育、群测群防、预演预练、避险救助中发挥作用，实现救助生命的根本任务。

参考文献

1 Kitoh A, Endo H, Kumar K K, et al. Monsoons in a changing world: A regional perspective in a global context. Journal of Geophysical Research – Atmospheres, 2013, 118(8): 3053-3065.

2 Wang B, Biasutti M, Byrne M P, et al. Monsoons climate change assessment. Bulletin of the American Meteorological Society, 2021, 102(1): E1-E19.

3 史军, 梁萍, 万齐林, 等. 城市气候效应研究进展. 热带气象学报, 2011, 27(6): 942-951.
Shi J, Liang P, Wan Q L, et al. A review of the progress of research on urban climate. Journal of Tropical Meteorology, 2011, 27(6): 942-951. (in Chinese)

4 Collier C G. The impact of urban areas on weather. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2006, 132(614): 1-25.

5 Matsumoto J, Fujibe F, Takahashi H. Urban climate in the Tokyo metropolitan area in Japan. Journal of Environmental Sciences, 2017, 59: 54-62.

Prevention Countermeasures and Suggestions for Urban Rainstorm Disasters Under Changing Environment

ZHANG Chuhan* WANG Guangqian* LI Tiejian

（1 Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2 State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China）

Abstract On July 20, 2021, an extraordinary rainstorm struck Zhengzhou, Henan Province, marked a new intensity record over China mainland. This rainstorm exceeded the capacity of drainage and flood protection systems in the urban districts and its surrounding rural areas of the city, and thus caused extensive inundation and flooding. This is an extraordinary severe natural disaster with heavy casualties and property loss. To have a broad view over the whole country and to look into the future for rainstorm disaster prevention, we proposed the following suggestions in this study. First, we must recognize the significant impact of the climate change and rapid urbanization on the prevention and mitigation of urban rainstorm disasters, and sharpen our risk awareness under the changing environments. Second, we should put rainstorm disaster prevention as a rigid constraint for urban space arrangement and development, revise the related planning correspondingly, and construct the urban infrastructure system for disaster prevention at a faster pace. Third, we should take multiple measures comprehensively to promote emergency management, for rainstorm disaster prevention, and mitigation of cities in a scientific way.

Keywords rainstorm, city, flooding and inundation disasters, infrastructure system, emergency management

*Corresponding author



张楚汉 中国科学院院士。清华大学教授，主要从事水利工程与水科学研究。主持或参与了我国南水北调工程、西南大水电站群开发等项目研究，以及水利学科发展战略、黄河水与工程方略、城市特大暴雨致灾防御的关键问题与对策等重大战略咨询项目。E-mail: zch-dhh@tsinghua.edu.cn

ZHANG Chuhan Professor at Tsinghua University, Member of the Chinese Academy of Sciences (CAS). His research field concentrates on hydraulic engineering and hydroscience. He presided over or participated in major engineering projects from the CAS, with topics including the South-to-North Water Diversion Project, the development of large hydropower stations in Southwest China, and consulting projects from CAS, including the development strategy of hydroscience and engineering, water resources and engineering strategy of the Yellow River, and the key problems and countermeasures for urban rainstorm disasters. E-mail: zch-dhh@tsinghua.edu.cn



王光谦 中国科学院院士。清华大学教授。主要从事水科学、泥沙与河流动力学研究等。现任清华大学副校长、第十三届全国政协常委，中国民主同盟第十二届中央副主席。
E-mail: dhhwgq@tsinghua.edu.cn

WANG Guangqian Professor at Tsinghua University, Member of the Chinese Academy of Sciences. Currently, he is Vice President of Tsinghua University, a member of the Standing Committee of the 13th CPPCC National Committee, and Vice Chairman of the 12th Central Committee of the China Democratic League. His research fields include hydroscience, sediment and river dynamics. E-mail: dhhwgq@tsinghua.edu.cn

■责任编辑：张帆